

Robot s kombinovaným podvozkom

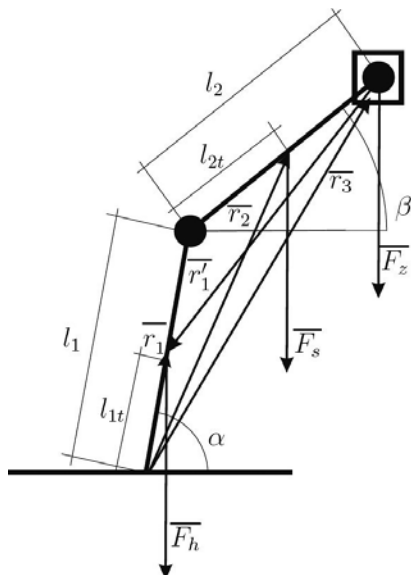
Mobilné robotické systémy na pohyb v zložitom teréne používajú predovšetkým kráčajúce podvozky. Kráčajúce systémy majú obmedzenia z hľadiska využitia, predovšetkým čo sa týka stability, zložitosti riadenia, nosnosti, rýchlosti, spotreby energie a pod. Systémy s kombinovaným podvozkom umožňujú riešenie niektorých z uvedených ohraňení. Článok sa venuje analýze vlastností koncepcií kombinovaného podvozku.

Úvod

Na pohyb v zložitom teréne sú vhodné predovšetkým kráčajúce systémy. Tie sú schopné prekonať prekážky, v teréne sa pohybovať bez poškodzovania prostredia, obvykle sú schopné pohybovať sa v ľubovoľnom smere a pod. Vzorom pre kráčajúce robotické systémy sú biologické systémy. Z toho vyplývajú dvojnohé, štvornohé a viacnohé systémy. Obvyklý je párný počet nôh. Boli však postavené robotické systémy s nepárnym počtom „končatín“. Aplikácie týchto systémov sú veľmi široké. Ide o inšpekčné roboty, o roboty na prácu v lese, na pohyb v členitom teréne, pohybujúce sa na piesku a pod. Kolesové alebo pásové podvozky majú oproti kráčajúcim výhody v rýchlosti pohybu, rovnomernosti pohybu, v statickej stabilite systému, menšej spotrebe energie a pod.

Niektoré problémy použitia kráčajúcich systémov rieši robotický systém s kombinovaným podvozkom – s nohami a kolesami. Tak ako pri kráčajúcich systémoch aj tu sú možné viaceré alternatívy. V článku sa zameriame na systém s dvoma nohami a dvoma kolesami.

Priechnosť robotického systému prostredím závisí od viacerých faktorov. Pri systémoch s kombinovaným podvozkom ju určuje predovšetkým koncepcia systému, rozmery, hmotnosť, ale aj rozloženie hmotnosti na platforme robota (poloha ťažiska). Poloha ťažiska zároveň ovplyvňuje statickú stabilitu systému, ale aj transportnú silu, ktorú vyvinú nohy systému pri pohybe. Preto sú základnými otázkami analýza stability systému, veľkosť momentov v kĺboch, poloha platformy a rovnomernosť pohybu. Tak ako



Obr.1 Sily a momenty – noha s dvoma článkami

pri manipulačných systémoch aj pri návrhu koncepcie nohy robota treba urobiť kompromis medzi počtom osí pohybu a dosiahnuteľnou kvalitou riadenia pohybu nohy a celej platformy mobilného robota. Sú to nielen otázky energetické, ale i cenové, hmotnosti, zložitosti konštrukcie atď.

1. Analýza momentov v kĺboch

V nasledujúcom texte je uvedená problematika momentov jednej dvojčlánkovej nohy (obr. 1). Základom na určenie momentov sú rovnice kráčajúceho mechanizmu.

Na obr. 1 predstavujú čierne krúžky kĺby nohy (horný je bedrový kĺb, dolný je koleno), štvorček znázorňuje zaťaženie nohy robota. Predpokladáme, že systém stabilne stojí. Pre prvý kĺb platí:

$$M_s = \vec{r}_1 \cdot \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \cdot \vec{F}_2 + \vec{r}_3 \cdot \vec{F}_3 \quad (1)$$

Úpravou vektorových súčinov na skalárne rovnice:

$$\begin{aligned} M_{s1} &= l_1 m_1 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \\ M_{s2} &= |r_2| m_2 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \arccos\left(\frac{y_{2t}}{|r_2|}\right)\right) \\ y_{2t} &= l_1 \cos(\alpha) + l_{2t} \cos(\beta) \\ |r_2| &= \sqrt{(l_1 \cos(\alpha) + l_{2t} \cos(\beta))^2 + (l_1 \sin(\alpha) + l_{2t} \sin(\beta))^2} \\ M_{s3} &= |r_3| m_3 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{y_{3t}}{|r_3|}\right)\right) \\ y_{3t} &= l_1 \cos(\alpha) + l_2 \cos(\beta) \\ |r_3| &= \sqrt{(l_1 \cos(\alpha) + l_2 \cos(\beta))^2 + (l_1 \sin(\alpha) + l_2 \sin(\beta))^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Celkový statický moment vyjadríme ako:

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} + M_{s3} \quad (3)$$

Dynamické rovnice pre prvý – bedrový kĺb, dynamické zložky pri pohybe holene bez pohybu stehna:

$$\begin{aligned} \vec{M}_{d1} &= J_1 \ddot{\epsilon}_1 \quad \text{kde} \quad J_1 = J_{1t} + m_1 |r_1|^2 \\ \vec{M}_{d2} &= J_2 \ddot{\epsilon}_1 \quad \text{kde} \quad J_2 = J_{2t} + m_2 |l_{2t}|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Statické momenty pre kĺb v kolene nohy robota:

$$\begin{aligned} M_{s1} &= l_{2t} m_2 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \\ M_{s2} &= l_2 m_3 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \\ M_{s3} &= l_1 m_1 g \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right) \end{aligned} \quad (5)$$

Celkový statický moment pre kĺb v kolene je:

$$M_s = M_{s1} + M_{s2} + M_{s3} \quad (6)$$

Dynamické momenty v kolene robota sú:

$$\begin{aligned} \vec{M}_{d1} &= J_1 \vec{\epsilon}_1 \quad \text{kde} \quad J_1 = J_{1t} + m_1 l_{1t}^2 \\ \vec{M}_{d2} &= J_2 \vec{\epsilon}_1 \quad \text{kde} \quad J_2 = J_{2t} + m_2 |l_{2t}|^2 \\ \vec{M}_{d3} &= J_3 \vec{\epsilon}_1 \quad \text{kde} \quad J_3 = J_{3t} + m_3 |l_{3t}|^2 \end{aligned} \quad (7)$$

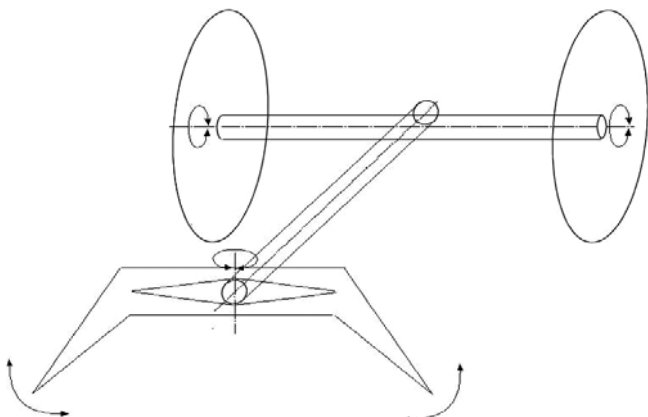
V rovniciach statických momentov (2) a (5) nevystupujú momenty zotrvačnosti článkov nohy ani záťaže, t. j. stačí určiť hmotnosť a rozmery článkov nohy. Pri dynamických momentoch (rov. (4) a (7)) však treba určiť aj momenty zotrvačnosti.

2. Konceptie kombinovaných podvozkov

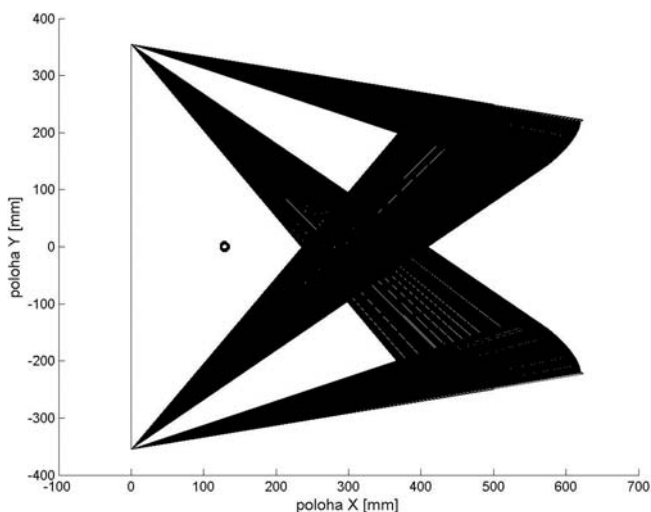
Pre prípad kombinovaného podvozku, ktorý sme vybrali na analýzu (dve nohy a dve kolesá), existuje viac riešení, ktoré majú odlišné vlastnosti. Analyzovali sa systémy s párom spojených nôh, s dvojčlánkovými nohami a robot s nohami s tromi stupňami voľnosti. Prvým systémom, ktorého vlastnosti systému sme skúmali, mal pár pevných nôh, ktoré sa môžu otáčať okolo zvislej a vodorovnej osi. Konceptia je uvedená na obr. 2.

Pre všetky konceptie boli zvolené parametre:

- rozpätie chodidiel v základnej polohe $d = 0,5$ m,
- vzdialenosť medzi osou kolies a stredom páru nôh $l = 0,5$ m,
- rozchod kolies $s = 0,7$ m,
- polomer kolies $r = 0,2$ m,
- hmotnosť jedného kolesa $m_k = 7,5$ kg,
- hmotnosť jedného chodidla $m_{ch} = 0,2$ kg,
- hmotnosť tela robota $m_t = 14,6$ kg,
- hmotnosť nôh $m_n = 10$ kg.



Obr.2 Konceptia s párom spojených nôh

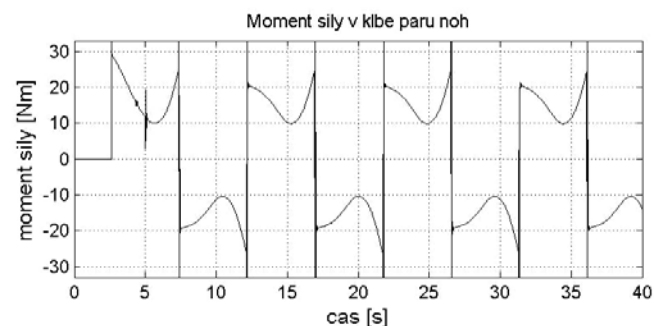
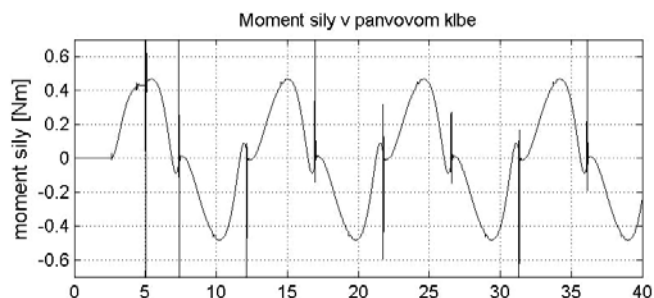


Obr.3 Pohyb ťažiska v súradnicovom systéme robota

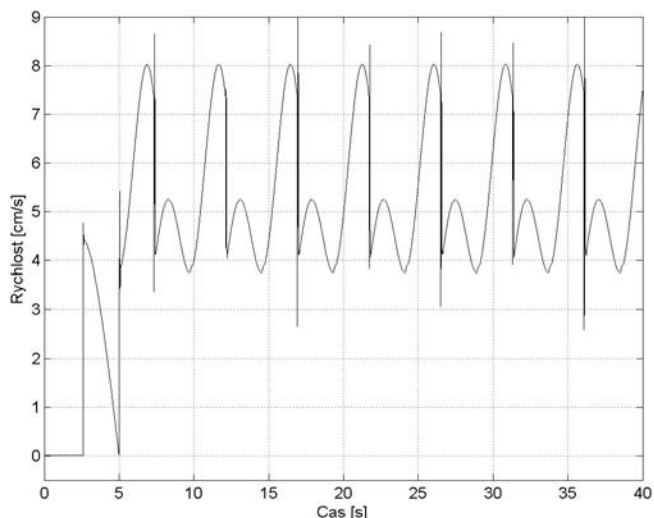
Z týchto predpokladov vyplýva, že celková hmotnosť robota je $m = 40$ kg. Hmotnosť nôh, nakoľko konštrukcia nôh sa pri jednotlivých koncepciách najviac líši, bude rozdelená na jednotlivé súčasti nôh.

V tejto koncepcii sa rozdelila hmotnosť $m_n = 10$ kg takto:

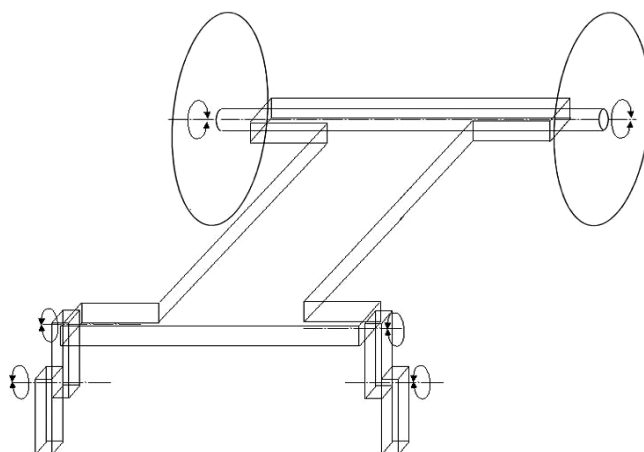
- hmotnosť páru nôh $m_p = 8$ kg,
- hmotnosť otočnej panvy $m_p = 2$ kg.



Obr.4 Momenty potrebné na priamy pohyb



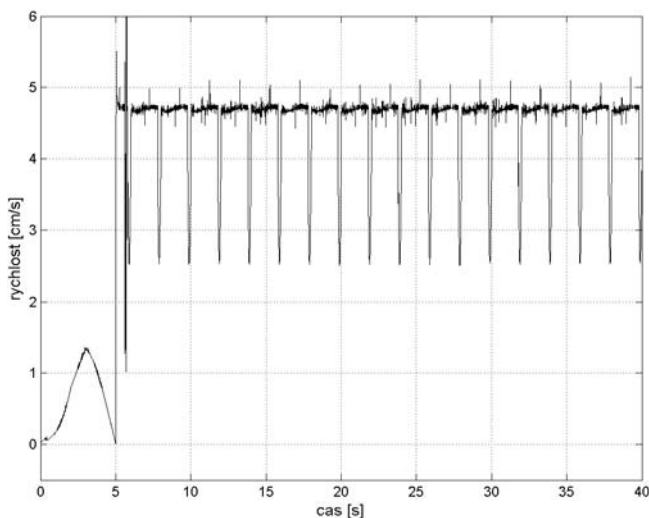
Obr.5 Priebeh rýchlosti robota prvej koncepcie



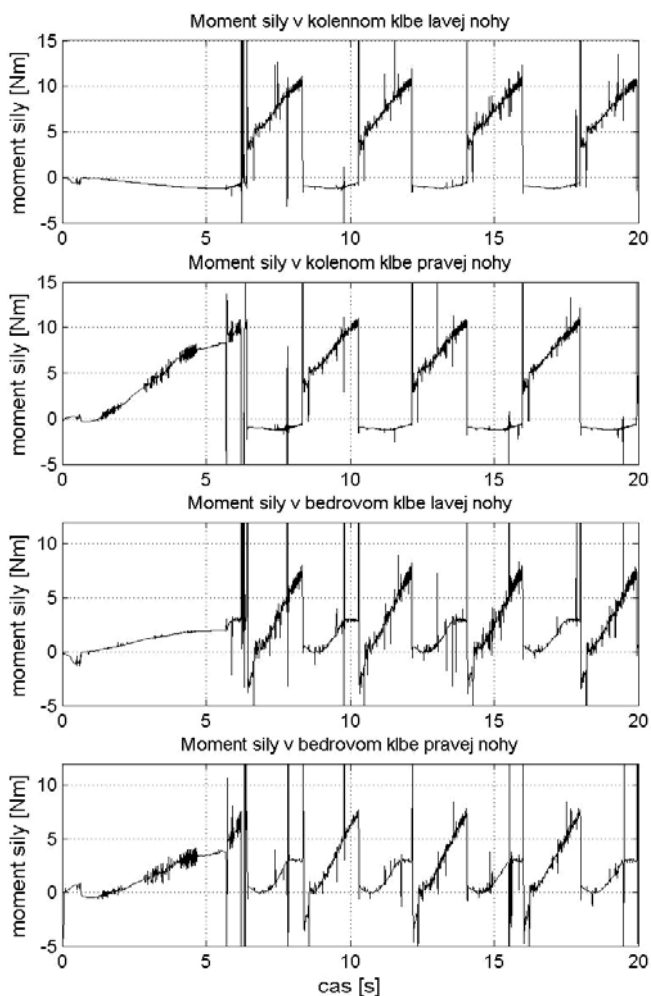
Obr.6 Robot druhej koncepcie

Všetky koncepcie majú v základnej polohe rovnakú polohu ťažiska. Ťažisko sa nachádza na pozdĺžnej osi robota približne 13 cm od osi kolies (smerom k nohám). Pri pohybe robota vpred sa vplyvom pohybu nôh mení poloha ťažiska robota. Na obr.3 je znázorená stabilná oblasť pre ťažisko robota. Z analýzy vyplýva, že ťažisko sa pohybuje len veľmi nepatrne (súradnicový systém robota – os Y je totožná s osou kolies a os X s osou robota).

Na priamy pohyb sú potrebné momenty znázornené na obr. 4. Vidno, že na natočenie páru nohy je potrebný značný moment, čo vyplýva z použitej koncepcie (sila pôsobí na dlhom ramene). Na obr. 5 je priebeh rýchlosti robota. Rovnomernosť pohybu je veľmi nízka. Spôsobené je to pomerne zložitým pohybom platformy robota pri kráčaní.



Obr.7 Rýchlosť robota druhej koncepcie pri kráčaní vpred

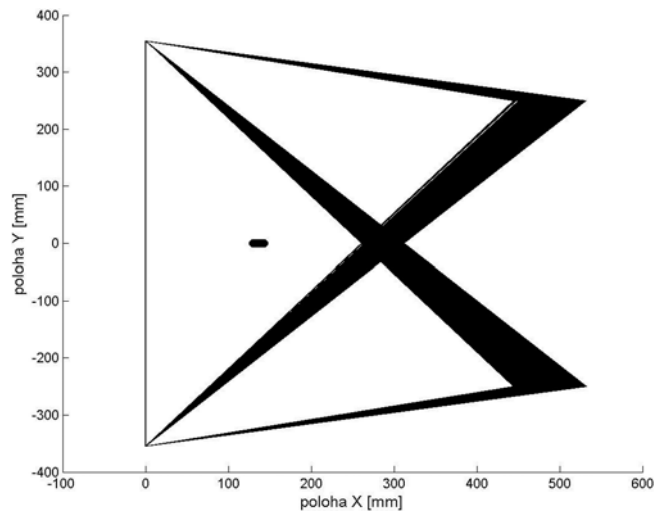


Obr.8 Momenty v kĺboch druhej koncepcie pri chôdzi

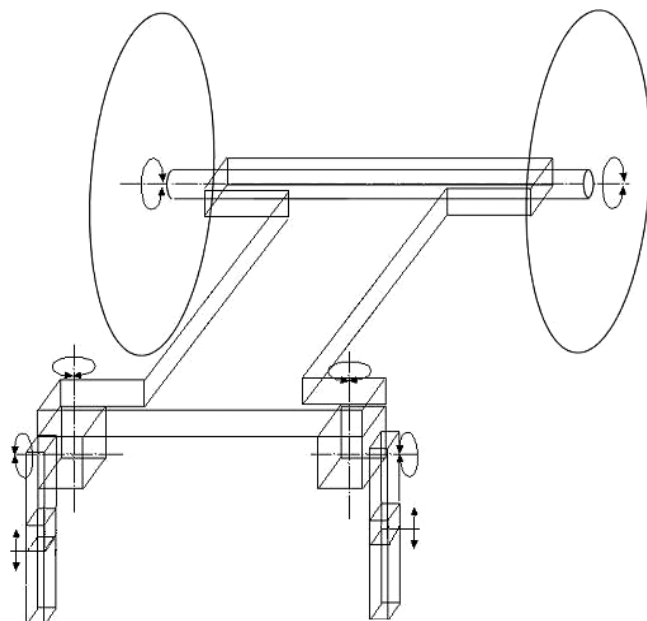
Robot druhej koncepcie (dvojčlánkové nohy pripevnené priamo na tele robota) je znázornený na obr. 6.

Na analýzu sa použili rovnaké základné parametre ako v prvej koncepcii. Hmotnosť nôh bola rozdelená takto:

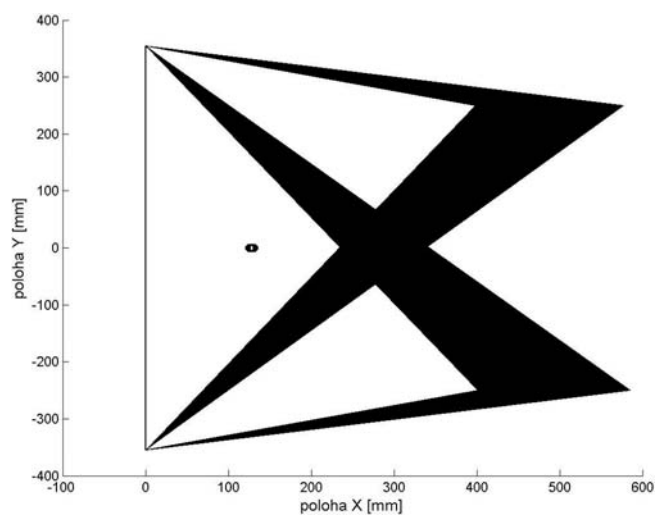
- hmotnosť jedného stehna $m_s = 2,5$ kg,
- hmotnosť jednej holene $m_h = 2,5$ kg.



Obr.9 Pohyb ťažiska robota druhej koncepcie pri pohybe



Obr.10 Koncepcia robota s posuvným kolenným kĺbom



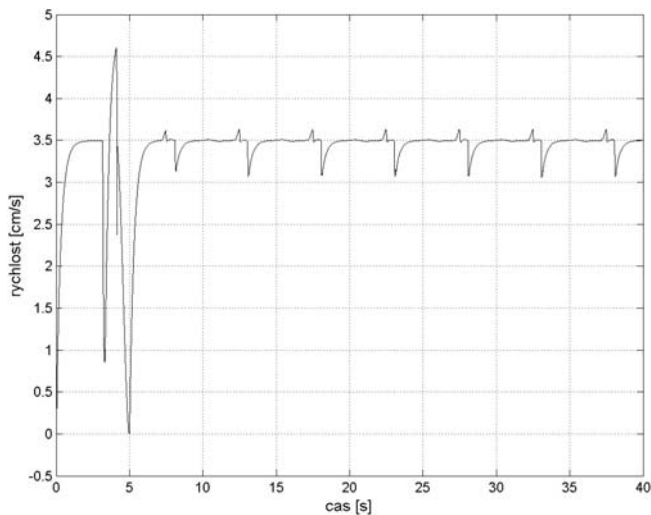
Obr.11 Pohyb ťažiska robota koncepcie 3

V tejto koncepcii sa dá dosiahnuť len priamočiary pohyb, preto nie je na praktické použitie vhodná. Výhodou oproti predchádzajúcej je výrazne rovnomernejšia rýchlosť pohybu (obr. 7) a menšie momenty v kĺboch (obr. 8). V tejto koncepcii možno meniť vlastnosti robota prostredníctvom východiskových uhlov v kĺboch. Mení sa tým výška robota, ale aj rozloženie momentov na jednotlivé kĺby.

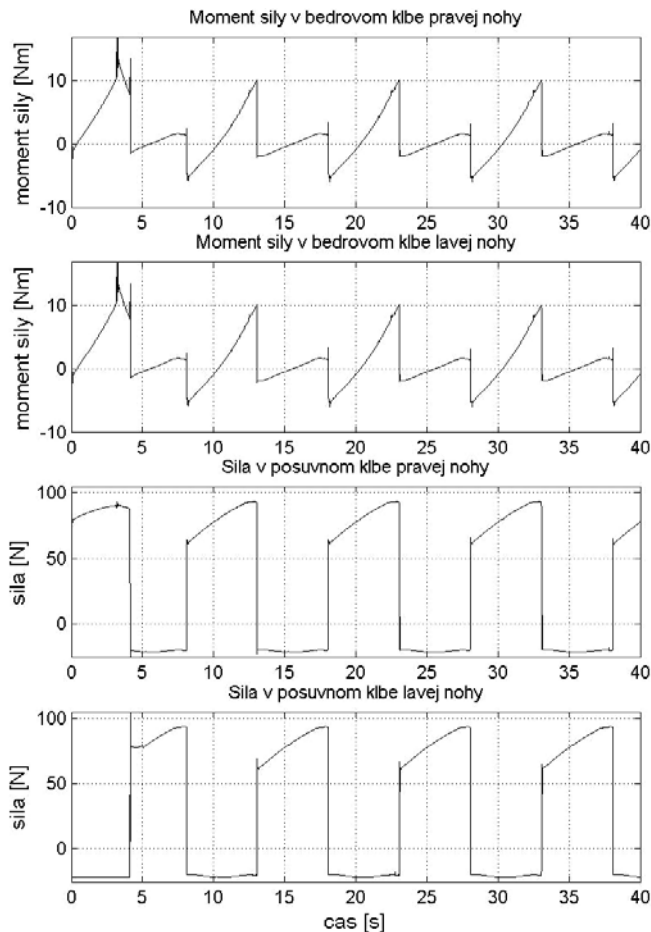
Ako ďalšia sa analyzovala koncepcia robota s chodidlami s tromi stupňami voľnosti – dva rotačné kĺby a jeden posuvný (namiesto kolena). Robot je znázornený na obr. 10.

Hmotnosť určenú pre nohy bola rozdelená takto:

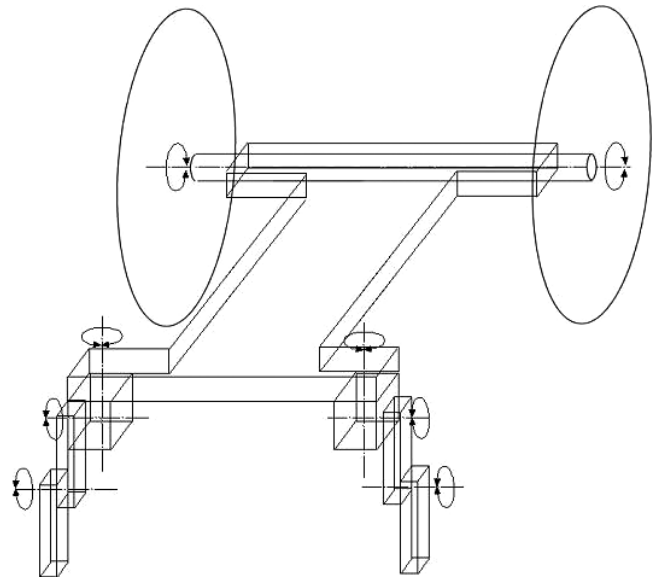
- hmotnosť jedného stehna $m_s = 2$ kg,
- hmotnosť jednej holene $m_h = 2$ kg,
- hmotnosť jednej panvy $m_p = 1$ kg.



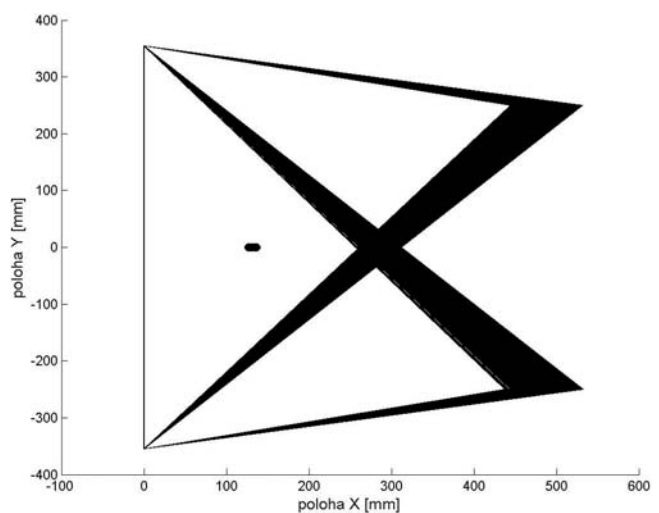
Obr.12 Priebeh rýchlosti robota koncepcie 3



Obr.13 Priebeh momentov a síl v kĺboch robota



Obr.14 Štvrtá koncepcia robota s kombinovaným podvozkom



Obr.15 Pohyb ťažiska robota – 4. koncepcia

V tejto koncepcii je už možný pohyb po inej trajektórii než po priamke. Za určitých podmienok pre rozsah pohybu v kĺboch možno dosiahnuť otáčanie robota na mieste. Na obr. 11 je pohyb ťažiska robota pri chôdzi po priamke.

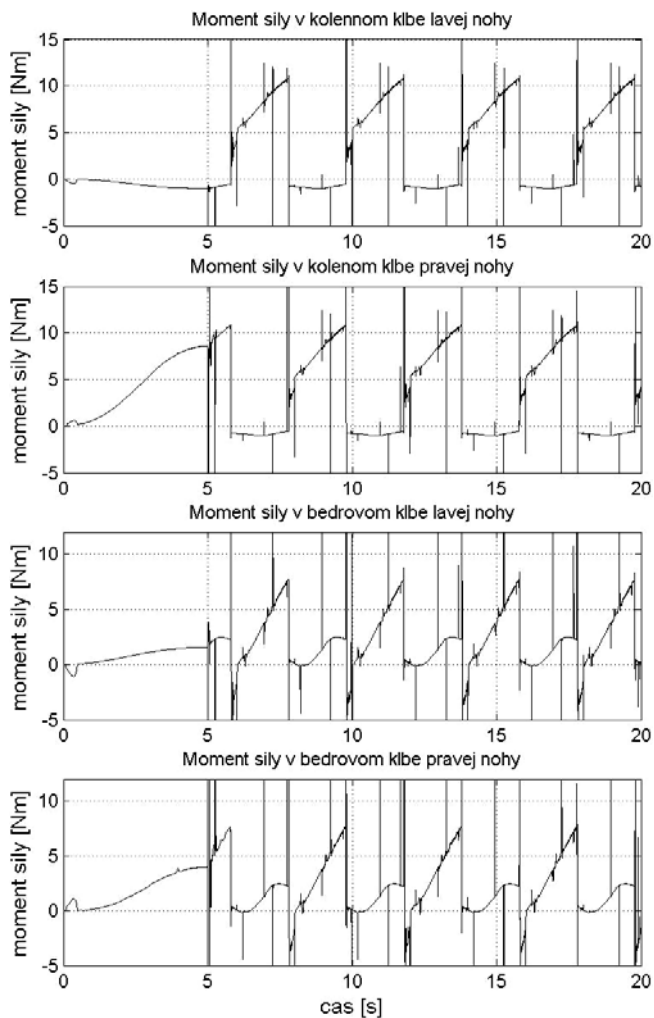
Na obr. 12 je priebeh rýchlosti robota tejto koncepcie.

Koncepcia robota s chodidlami, ktoré majú tri osi pohybu (všetky rotačné), je na obr. 14. Hmotnosť určená pre nohy bola rozdelená rovnakým spôsobom ako v predchádzajúcom prípade. Články nôh sú v tejto koncepcii a koncepcii č. 2 rovnako dlhé.

V tejto koncepcii je tiež možný pohyb po inej trajektórii než priamkovej. Na obr. 15 je pohyb ťažiska robota pri pohybe nôh. Z obrázkov znázorňujúcich pohyb ťažiska vidno, že pri všetkých uvádzaných koncepciách sa pohybuje nepatrne, v podstate si zachováva svoju polohu.

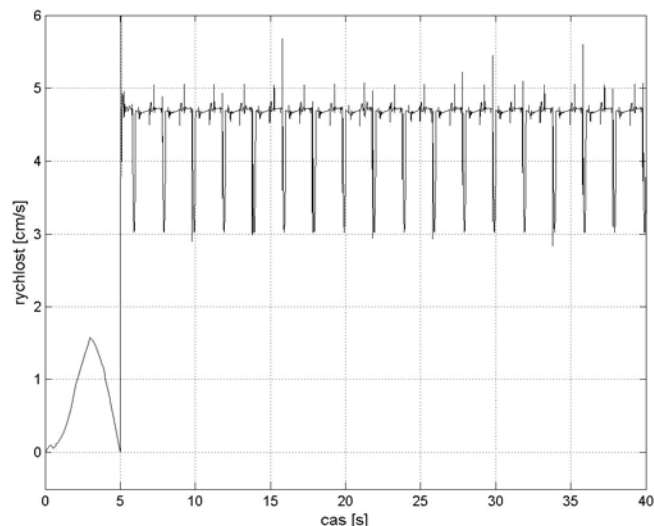
Záver

Posledná uvedená koncepcia je z hľadiska pohyblivosti najvýhodnejšia. Pohyb nôh pri tejto koncepcii nie je mechanicky prepojený, ako to bolo v prípade prvej koncepcie. Oproti druhej koncepcii môže robot vykročiť i do strany, čím sú umožnené zmeny smeru chôdze. Výhodou poslednej koncepcie je aj to, že chodidlo má tri stupne voľnosti, čiže ho možno položiť na určenú pozíciu. Ak porovnáme priebehy momentov v kĺboch koncepcií, táto koncepcia má menšie momenty v kĺboch ako v prípade druhej koncepcie, rovnomernejšiu chôdzu. Rovnomernú chôdzu má aj



Obr.16 Momenty v kĺboch robota – 4. koncepcia

druhá koncepcia, ale tá neumožňuje zmenu smeru pohybu. V prípade prekonávania prekážky je tu možnosť ťahať oboma nohami. Samozrejme, musí ísť o prekážku, ktorá sa dá prekonať jedným krokom.



Obr.17 Priebeh rýchlosti robota – 4. koncepcia

Literatúra

- [1] BARTA, Š.: Fyzika dynamických procesov. Vydavateľstvo STU, Bratislava 2002.
- [2] PALČÁK, F.: Teória mechanizmov. Vydavateľstvo STU, Bratislava 1993.
- [3] www.ktm.sjf.stuba.sk/atc
- [4] www.fzi.de – január 2003 Walking Maschine Catalogue
- [5] www.mscsoftware.com, www.mscsoftware.cz

Ing. Marian Klúčik
prof. Ing. Ladislav Jurišica, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra automatizácie a regulácie
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
e-mail: ladislav.jurisica@stuba.sk